

ВПЛИВ ВИБОРУ ЧАСУ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА РЕЗУЛЬТАТИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЯ

Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко, О.Л. Дугін
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Вступ. Прискорені темпи розвитку інформаційно-вимірювальних технологій і методів цифрової обробки сигналів створюють умови для удосконалення методів і засобів обробки інформаційних сигналів неруйнівного контролю. Ця загальна тенденція має місце і в вихрострумівому контролі (ВСК). До кола ключових завдань останнього відносяться підвищення інформативності та реалізація режиму багатопараметрового контролю [1, 2]. Один з актуальних методів вирішення цих завдань пов'язаний з використанням імпульсного режиму збудження вихрових струмів [3, 4]. Його суть полягає у впливі через вихрострумівий перетворювач (ВСП) імпульсним сигналом на об'єкт контролю (ОК), формуванні реакції системи ВСП - ОК у вигляді зазату гармонічного коливання і подальшому оцінюванні параметрів ОК та характеристик його матеріалу за такими інформативними параметрами сигналу ВСП, як декремент коливального сигналу та частота власних коливань. Застосування методу обробки сигналу ВСП на основі дискретного перетворення Гільберта дає змогу отримувати амплітудні і фазові характеристики цього сигналу (АХС і ФХС), що істотно спрощує подальше оцінювання їх інформативних параметрів. Процес оцінювання параметрів сигналів ВСП через особливості обчислювальних ефектів, а також дії шумів і завад різної природи супроводжується виникненням похибки. Методична складова похибки визначається особливостями використаних цифрових методів обробки сигналів та режимів отримання даних [5].

Мета і завдання дослідження. В роботі [6] розглянуто можливість підвищення точності визначення декремента сигналів ВСК, які виникають як реакція на імпульсне збудження вихрових струмів, у вигляді загасаючих гармонічних коливань за рахунок вибору оптимального інтервалу часу аналізу цього сигналу. Однак повний аналіз впливу цього фактору не проведено. Метою роботи є дослідження впливу часу аналізу сигналу імпульсного ВСК у вигляді загасаючого гармонічного коливання на похибку визначення декремента цього сигналу.

Для зазначеної задачі модель сигналу ВСП в загальному вигляді може бути представлена адитивною сумішшю згасаючих гармонічних коливань і гаусового шуму:

$$u_{\text{всп}}(t) = Ue^{-\alpha t} \cos(2\pi ft) + u_{\text{ш}}(t), t \in (t_1, t_2) \quad (1)$$

де U – амплітудне значення сигналу ВСП, α – декремент сигналу, f – частота власних коливань, t – поточний час, (t_1, t_2) – інтервал часу аналізу сигналу ВСП, $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова складова сигналу, яка розглядалась як реалізація гаусового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 .

Необхідно визначити декремент α сигналу ВСП з використанням методів регресійного аналізу, а також визначити точність його оцінювання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- 1) застосувати нелінійний регресійний аналіз до задачі оцінювання АХС ВСП і довірчого інтервалу її значень;
- 2) визначити декремент сигналу ВСП з урахуванням оптимального часу аналізу цього сигналу;

3) оцінити похибку визначення декременту сигналу ВСП з урахуванням застосування методів регресійного аналізу та оптимального часу аналізу сигналів ВСП.

Методика вирішення поставленого завдання. Поставлена задача вирішувалася методом моделювання. Для цього було сформовано сигнал виду (1) з наступними параметрами: $A = 1\text{В}$, $f = 500\text{кГц}$, $\alpha = 3 \cdot 10^5\text{с}^{-1}$. Час дискретизації обраний рівним $T_d = 20 \cdot 10^{-9}\text{с}$. В якості завади був використаний гаусовий шум. На часовому інтервалі аналізу співвідношення сигнал / шум (A/σ) змінювалося в діапазоні від 1% до 10%. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП наведено на рис. 1 (крива 1).

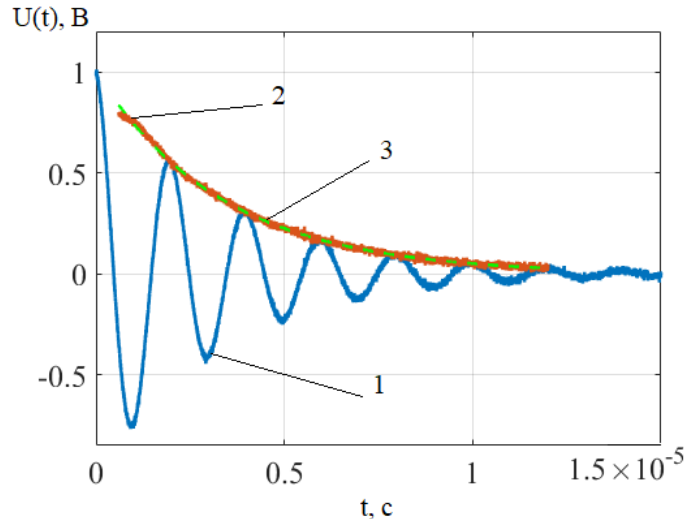


Рис. 1. Фрагмент сигналу ВСП і його амплітудної характеристики: 1 - сигнал ВСП, 2 та 3 - амплітудна характеристика сигналу і її тренд відповідно

Алгоритм обробки сигналів перетворювача. Порядок обробки інформаційних сигналів ВСП з імпульсним збудженням передбачав (рис. 2) формування вибірки сигналу $u_{\text{всп}}[j]$ і використання дискретного перетворення Гільберта для отримання Гільберт-образу і обвідної цього сигналу:

$$u_H[j] = \mathbf{H}[u_{\text{всп}}[j]], \quad (2)$$

$$A[j] = \sqrt{u_{\text{всп}}^2[j] + u_H^2[j]}, \quad (3)$$

де \mathbf{H} – оператор дискретного перетворення Гільберта; $A[j]$ – дискретна АХС.

З метою усунення впливу шумів на АХС було розглянуто використання методів нелінійного регресійного аналізу. Беручи до уваги нелінійність АХС, і можливість її представлення експоненційною функцією виду $ke^{\alpha t}$, завдання визначення лінії регресії зводилося до визначення лінійної регресії логарифмічної функції від АХС, тобто до визначення лінійної регресії функції виду [7]:

$$\ln(A[j]) = \ln(ke^{\alpha j T_d}) = \ln(k) + \alpha j T_d. \quad (4)$$

Провівши заміну і позначивши $\ln(k) = b$, рівняння (4) зводиться до лінійної функції $y(t) = \alpha t + b$, де поточний час $t = t_j = j T_d$.

Для визначення лінійної регресії був обраний метод Бартлетта-Кену. Даний метод відносно простий і може використовуватися для аналізу невеликих за обсягом вибірок. В основі методу лежить упорядкування даних за часом t і поділ корисної частини вибірки $A[j]$, $j = 50 \dots 600$, на три групи однакового обсягу M . У кожній групі обчислюються суми виду $\sum A[j]$ і $\sum t_j$. Позначимо їх відповідно A_1, A_2, A_3 і t_1, t_2, t_3 .

Тоді коефіцієнти лінійної регресії оцінюються співвідношеннями:

$$\alpha = \frac{A_3 - A_1}{t_3 - t_1}, \quad \text{та} \quad b = \frac{A_2}{M} - \alpha \cdot \frac{t_2}{M}. \quad (5, 6)$$

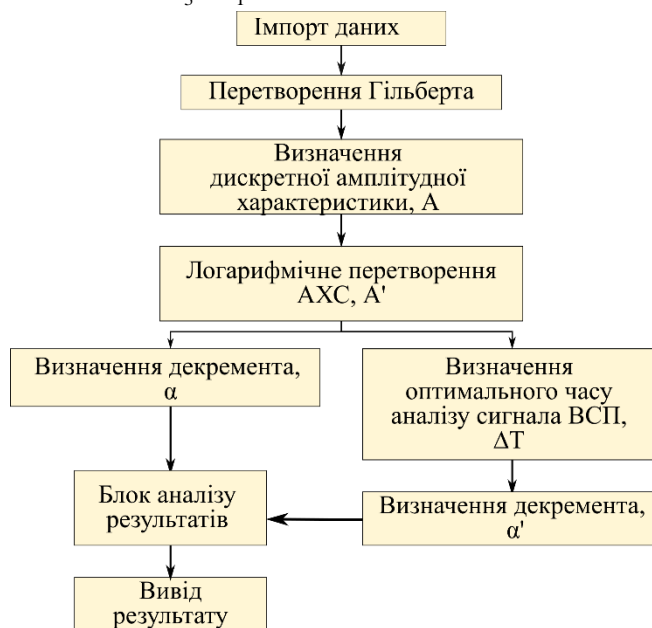


Рис. 2. - Графічне відображення методики опрацювання сигналу ВСП

Розрахунок коефіцієнтів лінійної регресії за отриманими даними моделі становив: $\alpha = 3.002 \cdot 10^5$, $b = 0.005$. З урахуванням отриманих результатів було проведено оцінювання похибки визначення функції $A(t)$ за формулами:

$$A(t) \pm \Delta_{A, \text{сер}}(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лін}, \bar{y}}(t)} \quad \text{та} \quad A(t) \pm \Delta_A(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лін}, y}(t)}, \quad (7, 8)$$

де $\Delta_{A, \text{сер}}(t)$ та $\Delta_A(t)$ - межі похибки середніх та індивідуальних значень обвідної, відповідно; $\Delta_{\text{лін}, \bar{y}}(t)$ та $\Delta_{\text{лін}, y}(t)$ - межі похибки середніх та індивідуальних значень лінеаризованої функції $y(t)$, відповідно.

Згідно проведених раніше досліджень [6] встановлено, що для мінімізації похибки визначення інформативних параметрів сигналу ВСП (1) в умовах імпульсного збудження, необхідно обирати інтервал часу аналізу сигналу з умови:

$$\alpha \Delta T \approx 1,10889. \quad (9)$$

Визначивши час аналізу сигналу ВСП ΔT за формулою (9), був зроблений перерахунок декремента α' за формулою (5).

Результати та їх обговорення. На рис. 3 (1 - сигнал перетворювача, 2 – тренд АХС, 3 - для середніх значень декремента сигналу, 4 - довірча область регресії для індивідуальних значень декремента сигналу) проілюстровані отримані результати визначення параметрів нелінійної регресії та наведені графіки довірчих областей регресії для розрахованих коефіцієнтів декремента сигналу ВСП з використанням тренда АХС із заданою вірогідністю ($P = 0.95$).

З графіків видно, що з метою мінімізації похибки визначення декремента сигналу ВСП доцільно вибирати для аналізу середню частину цього сигналу з найменшим значенням дисперсії.

За результатами проведеної серії модельних експериментів у кількості 100, отримано відхилення в значенні декремента α сигналу перетворювача, розрахованого за лініями

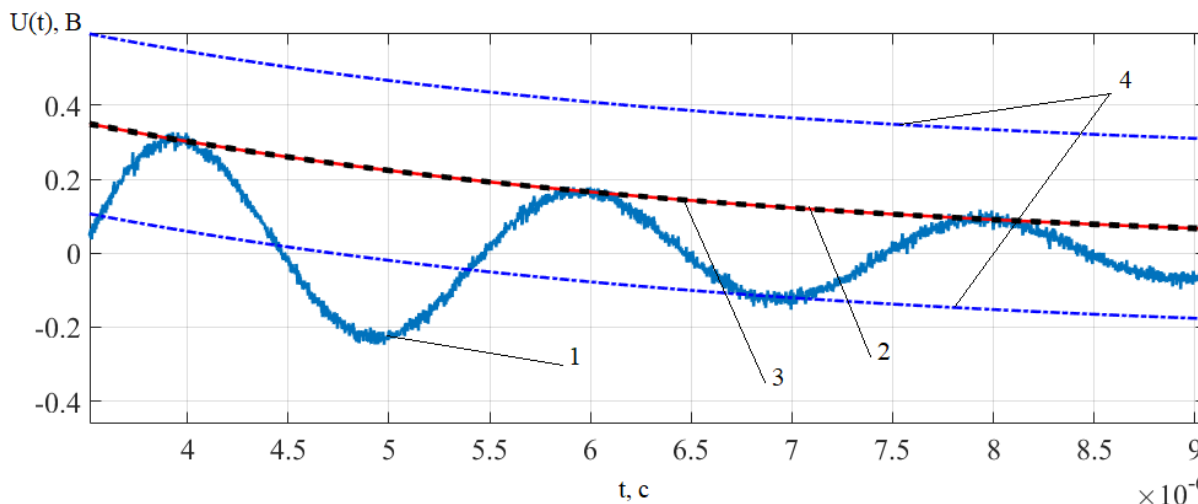


Рис. 3 - Фрагмент сигналу ВСП і межі довірчих областей регресії для значень АХС

регресії АХС, від заданого при моделюванні не більше 2,5%. У разі визначення декременту α з урахуванням оптимального часу аналізу, похибка не перевищувала 1,5%.

Висновки. У даній роботі наведені результати дослідження впливу вибору часу аналізу загасаючого гармонічного сигналу імпульсного ВСК на похибку визначення декременту цього сигналу. За результатами моделювання встановлено, що час аналізу сигналу доцільно обирати рівним або близьким до оптимальному часу і в середній області існування загасаючого сигналу перетворювача. Такий підхід дозволяє мінімізувати похибку визначення декременту сигналу ВСП, яка за результатами моделювання не перевищувала 1,5%.

Отримані результати підтверджують можливість використання запропонованого методу підвищення точності визначення декременту сигналу ВСП на основі визначення нелінійного тренда АХС. Враховуючи, що значення декременту сигналу є дуже чутливими до впливу завад, запропонований метод підвищення точності визначення декременту сигналу ВСП може бути застосований для сигналів з низьким рівнем співвідношення сигнал / шум.

Література

1. Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко, З.Т. Назарчук; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львов, 2004. - 247 с.
2. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львів: СПОЛОМ, 2013. - 268.
3. Adewale I. Decoupling the Influence of Permeability and Conductivity in Pulsed Eddy-Current Measurements / I.D. Adewale, G.Y. Tian // IEEE Trans. Magn. – 2013. – vol. 49, no. 3. – pp. 1119-1127.
4. Lysenko I. Pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Болгария, 2017. – №216. – С. 114–117.
5. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: First edition. — JCGM, Switzerland, 1993. – 120 p.
6. Kuts Yu. Analysis of the signal parameters measurement uncertainty at pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin // International Journal “NDT Days” – 2018. – Vol. 1, Iss. 4. – pp. 461-468.
7. Куц Ю. В. Статична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.